

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидаткиње Тамаре Мушкатиновић-Зекић, дипл. инж. електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 336 од 03.03.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Тамаре Мушкатиновић-Зекић, дипл. инж. електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под називом: „Развој ефикасних модела дигиталне предисторзије за хибридне *beamforming* mMIMO предајнике применом неуралних мрежа” (енгл. *"Development of Efficient Neural Network Digital Predistortion Models for Hybrid Beamforming mMIMO Transmitters"*).

У циљу уклањања енглеског термина у наслову теме на српском језику, као и скраћенице, комисија је сагласна да наслов теме буде:

„Модели дигиталне предисторзије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа” (енгл. *"Digital Predistortion Models for Hybrid Beamforming Massive Multiple-antenna Transmitters using Neural Networks"*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Тамара Мушкатиновић-Зекић рођена је 22. септембра 1982. године у Београду. Основну школу „Исидора Секулић“ у Београду је завршила 1997. године као ђак генерације и носилац Вукове дипломе. Током школовања освојила је бројне награде на општинским и градским такмичењима из математике и физике. Завршила је „Математичку гимназију“ у Београду 2001. године као носилац Вукове дипломе. Основне студије на Електротехничком факултету у Београду уписала је 2001. године. Дипломирала је на одсеку за Електронику, телекомуникације и аутоматику, смер Телекомуникације 2006. године, са просечном оценом 9.50 и оценом 10 за Дипломски рад на тему „Адаптивни антенски низови“. Током студирања је радила као демонстратор на предмету Теорија електричних кола и у лабораторији при катедри за Телекомуникације.

Од 2007. године запослена је у Регулаторној агенцији за електронске комуникације и поштанске услуге (тада Републичка агенција за телекомуникације). Током професионалне каријере радила је на пословима оцењивања усаглашености радио и телекомуникационе терминалне опреме, прегледа пројектне документације телекомуникационих мрежа, изради техничке документације, општих законских и подзаконских аката из области електронских

комуникација, као и на пословима техничког прегледа телекомуникационих објеката. Учествовала је у раду међународних органа и организација за стандардизацију ради остваривања регулаторних циљева при изради и развоју стандарда, као и у сертификацији телекомуникационе опреме у лабораторијама разних светских произвођача. Тренутно обавља послове вишег саветника за фиксне и сателитске радио-комуникације, у оквиру којих врши анализу захтева за нове доделе фреквенција и издавање/одузимање појединачних дозвола за коришћење радио-фреквенција, учествује у раду државних и међународних организација и институција из области телекомуникација (ITU, CEPT, ETSI) и сарађује са регулаторним и стручним телима држава чланица Европске уније и других држава ради усаглашавања праксе примене прописа из области фиксних и сателитских радио-комуникација.

Члан је Инжењерске коморе Србије од 2010. године, када је положила стручни испит из електротехничке струке са радом: „Главни пројекат РР система преноса у приступној GSM мрежи јавних мобилних телекомуникација на подручју нишког и пиротског округа“, и поседује лиценцу одговорног пројектанта телекомуникационих мрежа и система.

Течно говори енглески језик и служи се немачким језиком.

Њен стручни и научни рад обухвата објављивање радова у међународним и домаћим часописима, презентацију радова на домаћим и страним конференцијама. Аутор је или коаутор 18 научних и стручних радова, од којих је 1 рад објављен у међународном часопису са JCR листе, 2 рада у домаћим часописима, 14 радова објављено је у зборницима међународних конференција и 1 рад у зборнику конференција националног значаја.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Тамара Мушкатиновић-Зекић је завршила основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, смер Телекомуникације, са просечном оценом 9.50. Дипломски рад „Адаптивни антенски низови“, код ментора проф. др Мирослава Дукића, одбранила је 2006. године са оценом 10.

Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Телекомуникације, уписала је школске 2011/2012. године. На докторским студијама је положила све испите, са просечном оценом 9.9, и испунила све обавезе предвиђене планом докторских студија сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ. Списак положених предмета и обавеза је дат у следећој табели:

Р.б.	Предмет	Оцена	ЕСПБ
1.	Примењена статистика	9	9
2.	Когнитивне радио мреже	10	9
3.	Савремене радио-технологије	10	9
4.	Савремене технике контроле грешака у телекомуникацијама	10	9
5.	Увод у научни рад	10	6
6.	Бежични телекомуникациони системи	10	9
7.	Принципи модерних телекомуникација	10	9
8.	Случајни процеси у телекомуникацијама	10	9
9.	Бежичне информационе мреже	10	9
10.	Технике обраде и препознавања говорног сигнала	10	9
11.	Студијски истраживачки рад I		15
12.	Научно стручни рад		3
13.	Студијски истраживачки рад II		15
	Укупно остварено		120

Одржала је предавање по позиву на међународној конференцији:

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Bašić A., Panajotović B. „NFC tehnologija“, 7. *INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 254-266, December 2013, ISBN 978-86-88065-29.

Научно-истраживачко искуство у области предложене теме потврдила је објављивањем 1 рада у часопису међународног значаја (категорије M22), 1 рада у часопису националног значаја, 3 рада на конференцијама од међународног значаја и 1 рада на конференцији од националног значаја.

У току досадашњег научно-истраживачког рада Тамара Мушкатировић-Зекић је била аутор или коаутор 18 радова, од којих је 1 рад објављен у часопису међународног значаја (категорија M22), 2 рада у часописима националног значаја, 14 радова на конференцијама међународног значаја и 1 рада на конференцијама националног значаја:

Научни часописи међународног значаја

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Nešković N., Budimir Dj. „Efficient Neural Network DPD Architecture for Hybrid Beamforming mMIMO“, *Electronics*, 12 (3), 597, January 2023, <https://doi.org/10.3390/electronics12030597>, ISSN: 2079-9292, Impact Factor: 2.690, M22.

Научни часописи националног значаја

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Compensation of nonlinear distortion in hybrid beamforming MIMO transmitters“, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, Vol. 6, No. 1, pp. 26-30, Sep. 2022, e-ISSN: 2566-3682, DOI: 10.7251/IJEEC2206026Z, M53.
2. Janković M., Tintor V., Rašković J., **Muškatirović-Zekić T.** „Tržište telekomunikacija u republici Srbiji u 2006. godini“, *Stručno-naučni časopis Republičke agencije za telekomunikacije TELEKOMUNIKACIJE*, December 2007, M53.

Научне конференције међународног значаја (M33)

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Kompenzacija nelinearne distorzije kod hybrid beamforming MIMO predajnika“, *21st International Symposium INFOTEH-Jahorina*, pp. 72-76, March 2022., M33.
2. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Pregled rešenja digitalne predistorzije za hybrid beamforming MIMO predajnike“, *29. Telecommunication Forum (TELFOR) 2021*, pp. 1-4, November 2021, DOI: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653422, M33.
3. **Muškatirović-Zekić T.**, Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Pregled postojećih DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega“, *Zbornik radova - 65. Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2021*, pp. 604-609, September 2021, ISBN 978-86-7466-894-8, M33.
4. **Muškatirović-Zekić T.** „Analiza mogućnosti realizacije backhaul sistema sa velikom gustinom linkova u E-bandu“, *25. Telecommunication Forum (TELFOR) 2017*, pp. 1-4, November 2017, DOI: 10.1109/TELFOR.2017.8249322, M33.

5. **Muškatirović-Zekić T.**, Panajotović B., Bašić A. „Interfejsi i protokoli komunikacije u NFC“, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 13, pp. 512-517, March 2014, ISBN 978-99955-763-3-2, M33.
6. **Muškatirović-Zekić T.**, Bašić A., Panajotović B. „NFC tehnologija“, 7. *INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 254-266, December 2013, ISBN 978-86-88065-29, M31 (rad po pozivu).
7. Bašić A., **Muškatirović-Zekić T.**, Panajotović B. „Upravljanje rizikom po modelu ISO 31000 u pružanju telekomunikacionih usluga“, 7. *INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 80-91, December 2013, ISBN 978-86-88065-29, (rad po pozivu).
8. **Muškatirović-Zekić T.**, Simić M. „Neparametarske metode nadgledanja spektra“, 21. *Telecommunication Forum (TELFOR) 2013*, pp. 244-247, November 2013, M33.
9. **Muškatirović-Zekić T.** "Monitoring radio frekvencijskog spektra," 20th *Telecommunications Forum (TELFOR) 2012*, pp. 448-451, November 2012, DOI: 10.1109/TELFOR.2012.6419243, M33.
10. **Muškatirović-Zekić T.** „Migracija ka all-IP u mobilnim sistemima“, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 11, pp. 273-276, March 2012, ISBN 978-99938-624-8-2, M33.
11. **Muškatirović-Zekić T.**, Janković M. „SC-FDMA as the uplink access technology in LTE“, 4. *INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, December 2011, M33.
12. **Muškatirović-Zekić T.**, Janković M., Odadžić B. „potential LTE application in 2.6 GHz band“, 3. *INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 336-344, June 2011, ISBN 978-86-88065-16-0, M33.
13. **Muškatirović-Zekić T.** „LTE radio interfejs“, *INFOTEH-Jahorina*, Vol. 10, ref. B-II-1, pp. 129-133, March 2011, ISBN 978-99938-624-6-8, M33.
14. **Muškatirović-Zekić T.**, Panajotović B. „LTE as technology for next-generation mobile networks“, 2. *INTERNATIONAL Scientific Conference on Economic and Regional Development EUROBRAND*, TQM Center, pp. 429-438, December 2010, ISBN 978-86-88065-15-3, M33.

Научне конференције националног значаја (M63)

1. **Muškatirović-Zekić T.**, Nešković N., Budimir Dj. „Primena neuralnih mreža za kompenzaciju nelinearne distorzije u mobilnim sistemima nove generacije“, *PosTel 2022 - XL Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, November 2022.

Дана 07.03.2023. године одржана је јавна усмена одбрана теме докторске дисертације (докторски испит) пред Комисијом у саставу:

1. др Александар Нешковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (председник комисије),
2. др Никола Томашевић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин (члан комисије који није запослен на ЕТФ-у),
3. др Милан Илић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (члан комисије),
4. др Ђурађ Будимир, гостујући професор, Универзитет у Београду - члан комисије.

Комисија је једногласно закључила да кандидаткиња Тамара Мушкатиновић-Зекић испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације и оценила испит оценом - задовољила.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Приликом писања овог Извештаја, Комисија је размотрила све претходно наведене чињенице, искуства у научно-истраживачком раду, као и резултате досадашњег рада кандидатиње Тамаре Мушкатиновић-Зекић. На основу резултата које је кандидатиња постигла у свом досадашњем стручном и научном раду, публикованих научних резултата из области мобилних комуникационих система, и уже области дигиталне предисторзије, који су препознати и валоризовани од стране међународне научне заједнице, Комисија је закључила да је кандидаткиња испунила услове који је квалификују да приступи изради докторске тезе на предложену тему.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања докторске дисертације је анализа техника дигиталне предисторзије код хибридног *beamforming* mMIMO предајника и испитивање ефикасности примене различитих конфигурација неуралних мрежа за конструкцију DPD блока.

У данашњем савременом друштву, евидентан је убрзан и интензиван развој мобилних система нове генерације (постојећи 5G и будући 6G). Захтеви корисника за све бржим и поузданијим широкопојасним преносом података, са ултра малим кашњењем, путем мобилних мрежа и система су у порасту, те је стога неопходно повећати пропусни опсег (*bandwidth*) и спектралну ефикасност. Како је радио-фреквенцијски спектар ограничен ресурс, испуњење наведених захтева корисника постиже се коришћењем милиметарских таласа (*mmWave*), широкопојасних појачавача, mMIMO (*massive multiple-input multiple-output*) предајника и техника формирања снопа (*beamforming*). Са друге стране, посебна пажња се посвећује ефикасној употреби енергије (тзв. *green communications*). Како је појачавач снаге главни потрошач снаге у мобилним системима нове генерације, од њега се захтева да буде енергетски што ефикаснији, тј. да ради у области близу засићења. Последица тога је појава нелинеарне дисторзије сигнала и потреба за развијањем што ефикаснијих и софистициранијих техника дигиталне предисторзије (*Digital PreDistortion* - DPD) појачавача.

Посебно је актуелно коришћење mMIMO предајника у комбинацији са хибридним формирањем снопа (*hybrid beamforming* – HBF) [1]-[2]. Хибридни *beamforming* је комбинација аналогног *beamforming*-а у РФ домену и дигиталног *beamforming*-а у основном опсегу. Применом техника хибридног формирања снопа смањује се број фазних помераца, РФ ланаца и осталих скуних компоненти попут мешача и ADC/DAC конвертора, чиме се смањује потрошња снаге и комплексност опреме. Класичне технике дигиталне предисторзије се заснивају на увођењу додатног нелинеарног DPD блока пре појачавача, чија је улога смањење нелинеарне дисторзије коју тај појачавач уноси. Због великог броја појачавача код HBF mMIMO предајника, овакво решење је скупо и у већини случајева и неизводљиво. Стога компензација нелинеарне дисторзије код HBF mMIMO предајника представља значајну и изазовну област истраживања, и у литератури постоји велики број радова који се баве овом проблематиком [3]-[9].

Циљ истраживања докторске дисертације је реализација и развој ефикасних модела дигиталне предисторзије за хибридне *beamforming* mMIMO предајнике применом неуралних мрежа. Предност коришћења неуралних мрежа за компензацију нелинеарне дисторзије код хибридног *beamforming* mMIMO предајника се огледа у способности неуралних мрежа да

веома добро апроксимирају нелинеарне функције, као и у њиховој прилагодљивости. Променом услова средине неурална мрежа се може релативно брзо и лако поново истренирати и прилагодити новим условима. Већина досадашњих истраживања везаних за примену неуронских мрежа у области дигиталне предисторзије базирана је на примени различитих неуронских мрежа за линеаризацију једног појачавача [10]-[15]. Потребно је такође размотрити могућност имплементације предложених модела и у случају система са више корисника (*multiuser* - MU). У случају система са више корисника, сигнали који се шаљу након хибридног формирања снопа се формирају на основу података свих корисника, тако да приликом конструкције архитектуре предистортера треба узети у обзир сигнале свих корисника. Предложени модели за дигиталну предисторзију биће имплементирани и верификовани симулацијом у програмском пакету *Matlab*, коришћењем стварних измерених вредности појачавача.

Основни допринос овог истраживања био би унапређење ефикасности компензације нелинеарне дисторзије код савремених бежичних предајника, првенствено код хибридног *beamforming* mMIMO предајника.

Поред доприноса у виду унапређења ефикасности компензације, значај истраживања се огледа и у пружању прегледа литературе о достигнућима у области дигиталне предисторзије сигнала у савременим бежичним системима, као и у испитивању сложености и перформанси предложених техника за дигиталну предисторзију.

Предложена тема припада области која је веома актуелна, што се може закључити на основу великог броја објављених радова. Предложени модели за дигиталну предисторзију применом неуралних мрежа представљају ефикасно и софистицирано решење, у смислу смањења грешке линеаризације сигнала код хибридног *beamforming* mMIMO предајника, као и добру полазну основу за даље истраживање.

Релевантни библиографски извори за предложено истраживање:

- [1] A. F. Molisch et al., "Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 134-141, September 2017.
- [2] A. Singh, and S. Joshi, "A Survey on Hybrid Beamforming in MmWave Massive MIMO System," in *Journal of Scientific Research*, vol. 65, no. 1, pp. 201-213, January 2021.
- [3] L. Liu, W. Chen, L. Ma and H. Sun, "Single-PA-feedback digital predistortion for beamforming MIMO transmitter," 2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), June 2016, pp. 573-575.
- [4] M. Abdelaziz, L. Anttila, A. Brihuega, F. Tufvesson and M. Valkama, "Digital Predistortion for Hybrid MIMO Transmitters," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 12, no. 3, pp. 445-454, June 2018.
- [5] A. Brihuega, L. Anttila, M. Abdelaziz, T. Eriksson, F. Tufvesson and M. Valkama, "Digital Predistortion for Multiuser Hybrid MIMO at mmWaves," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 3603-3618, May 2020.
- [6] X. Liu et al., "Beam-Oriented Digital Predistortion for 5G Massive MIMO Hybrid Beamforming Transmitters," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp. 3419-3432, July 2018.
- [7] X. Liu, W. Chen, L. Chen, F. M. Ghannouchi and Z. Feng, "Power Scalable Beam-Oriented Digital Predistortion for Compact Hybrid Massive MIMO Transmitters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 12, pp. 4994-5006, Dec. 2020.
- [8] W. Qiao, G. Li, Y. Zhang, H. Li and F. Liu, "A Band-limited Digital Predistortion Method for Hybrid MIMO Transmitters," 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), May 2019.
- [9] X. Liu, W. Chen, J. Chu, F. M. Ghannouchi and Z. Feng, "Multi-Stream Spatial Digital Predistortion for Fully-Connected Hybrid Beamforming Massive MIMO Transmitters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no. 7, pp. 2998-3011, July 2021.
- [10] R. Hongyo, Y. Egashira, T. M. Hone and K. Yamaguchi, "Deep Neural Network-Based Digital Predistorter for Doherty Power Amplifiers," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 2, pp. 146-148, Februar 2019, DOI: 10.1109/LMWC.2018.2888955.
- [11] D. Wang, M. Aziz, M. Helaoui and F. M. Ghannouchi, "Augmented Real-Valued Time-Delay Neural Network for Compensation of Distortions and Impairments in Wireless Transmitters," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 242-254, Jan. 2019, DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2838039.

- [12] Z. Liu, X. Hu, T. Liu, X. Li, W. Wang and F. M. Ghannouchi, "Attention-Based Deep Neural Network Behavioral Model for Wideband Wireless Power Amplifiers," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 1, pp. 82-85, Jan. 2020, doi: 10.1109/LMWC.2019.2952763.
- [13] X. Hu, Z. Liu, W. Wang, M. Helaoui and F. M. Ghannouchi, "Low-Feedback Sampling Rate Digital Predistortion Using Deep Neural Network for Wideband Wireless Transmitters," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 4, pp. 2621-2633, April 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2966718.
- [14] P. Jaraut et al., "Augmented Convolutional Neural Network for Behavioral Modeling and Digital Predistortion of Concurrent Multiband Power Amplifiers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 9, pp. 4142-4156, Sept. 2021, doi: 10.1109/TMTT.2021.3075689.
- [15] X. Hu et al., "Convolutional Neural Network for Behavioral Modeling and Predistortion of Wideband Power Amplifiers," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 33, no. 8, pp. 3923-3937, Aug. 2022, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3054867.

3. Полазне хипотезе

Основне хипотезе од којих се полази у изради ове дисертације су:

- Технике дигиталне предисторзије представљају веома распрострањен и ефикасан метод за смањење изобличења, како унутар тако и ван опсега корисног сигнала, које уносе широкопојасни појачавачи, и као такве користе се у мобилним бежичним системима нове генерације у циљу побољшања квалитета сигнала.
- Постојећа решења за компензацију нелинеарне дисторзије код хибридног *beamforming* mMIMO предајника користе методе засноване на полиномима, које због великог броја појачавача у овим предајницима могу довести до велике рачунарске комплексности.
- Неуралне мреже су показале одличне особине код апроксимације нелинеарних континуалних функција и успешно су примењене у моделовању понашања појачавача снаге, као и у дигиталној предисторзији широкопојасних појачавача.

4. Научне методе истраживања

У оквиру истраживања биће коришћене следеће методе:

- Анализа научно-стручне литературе и објављених радова из области дигиталне предисторзије, у циљу дефинисања предности и недостатака постојећих техника за компензацију нелинеарне дисторзије.
- Анализа научно-стручне литературе и објављених радова из области неуралних мрежа.
- Рачунарске симулације у програмском пакету *Matlab*, у циљу одређивања оптималних параметара различитих архитектура неуралних мрежа које ће бити коришћене за дигиталну предисторзију сигнала код хибридног *beamforming* mMIMO предајника.
- Анализа података добијених током тестирања предложених оптималних архитектура неуралних мрежа, у циљу испитивања перформанси и комплексности, и верификације ефикасности предложених решења.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да из докторске дисертације проистекну следећи резултати:

- Систематски преглед литературе и техника из области дигиталне предисторзије.
- Предлог и оптимизација различитих модела неуралних мрежа за дигиталну предисторзију сигнала код хибридног *beamforming* mMIMO предајника.
- Имплементација предложених архитектура у програмском пакету *Matlab* и валидација смањења нелинеарне дисторзије коју уносе појачавачи код хибридног *beamforming* mMIMO предајника применом предложених решења.

- Предлог и оптимизација различитих архитектура неуралних мрежа за дигиталну предисторзију сигнала код хибридног *beamforming* mMIMO предајника са више корисника.
- Имплементација предложених архитектура у програмском пакету *Matlab* и валидација смањења нелинеарне дисторзије коју уносе појачавачи код хибридног *beamforming* mMIMO предајника са више корисника применом предложених решења.

Неки од резултата досадашњих истраживања приказани су у следећим радовима кандидата:

Научни часописи међународног значаја

1. Muškatirović-Zekić T., Nešković N., Budimir Dj. „Efficient Neural Network DPD Architecture for Hybrid Beamforming mMIMO“, *Electronics*, 12 (3), 597, January 2023, <https://doi.org/10.3390/electronics12030597>, ISSN: 2079-9292, Impact factor: 2.690, M22.

Домаћи часописи

2. Muškatirović-Zekić T., Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Compensation of nonlinear distortion in hybrid beamforming MIMO transmitters“, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, Vol. 6, No. 1, pp. 26-30, Sep. 2022, e-ISSN: 2566-3682, DOI: 10.7251/IJEEC2206026Z, M53.

Међународне конференције

3. Muškatirović-Zekić T., Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Kompenzacija nelinearne distorzije kod hybrid beamforming MIMO predajnika“, *21st International Symposium INFOTEH-Jahorina*, pp. 72-76, March 2022., M33.
4. Muškatirović-Zekić T., Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Pregled rešenja digitalne predistorzije za hybrid beamforming MIMO predajnike“, *29. Telecommunication Forum (TELFOR) 2021*, pp. 1-4, November 2021, DOI: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653422, M33.
5. Muškatirović-Zekić T., Čabarkapa M., Nešković N., Budimir Dj. „Pregled postojećih DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega“, *Zbornik radova - 65. Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2021*, pp. 604-609, September 2021, ISBN 978-86-7466-894-8, M33.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања, који ће да прати и структура рада, састоји се из неколико фаза:

1. Прва фаза – проучавање научно-стручне литературе из области дигиталне предисторзије. Преглед ће бити започет постојећим DPD моделима са ограниченом ширином пропусног опсега (*band-limited* DPD). Суштина ове фазе истраживања биће у сагледавању постојећих решења дигиталне предисторзије за HBF mMIMO предајнике. Поред описа самих модела, биће изложена и упоредна анализа модела у погледу перформанси. Такође, биће указано на неке од могућих проблема при примени предложених техника дигиталне предисторзије у широкопојасним системима нове генерације који представљају изазов за даље истраживање.
2. Друга фаза – проучавање научно-стручне литературе из области неуралних мрежа (*neural networks* - NN). Најчешће коришћени модели неуралних мрежа имају један улаз, један или више скривених слојева и један излаз. У зависности од броја скривених слојева, неуралне мреже се деле у две главне категорије: *shallow* и *deep*

неуралне мреже. Док *shallow* имају један или два скривена слоја, *deep* неуралне мреже имају најмање три скривена слоја са великим бројем неурона у сваком од њих. Са порастом броја скривених слојева, мрежа боље моделује проблем који се анализира, али комплексност система са становишта обраде сигнала расте. У раду ће бити анализирано неколико различитих модела неуралних мрежа са циљем остваривања оптималног решења проблема дигиталне предисторзије за HBF mMIMO предајник. За тренирање неуралних мрежа биће коришћен *Levenberg-Marquardt* оптимизациони алгоритам. Као мера квалитета анализираних решења рачунаће се њихова комплексност која се може изразити кроз број коефицијената, као и број *floating-point* операција (FLOPs).

3. Трећа фаза – дефинисање различитих архитектура система за дигиталну предисторзију код HBF mMIMO предајника применом неуралних мрежа и поређење њихових могућности линеаризације сигнала са становишта два параметра: *Error Vector Magnitude* (EVM) и *Normalized Mean-Squared Error* (NMSE). Треба нагласити да ће истраживање бити засновано на анализи дигиталне предисторзије код потпуно повезане архитектуре (*fully connected* - FC) хибридног *beamforming*-а која подразумева да је свака од антена повезана са сваком од P RF ланаца. Повратна информација за алгоритам дигиталне предисторзије биће узимана са излаза свих појачавача снаге, односно биће анализиран тзв. *direct-end feedback* DPD алгоритам. Циљ је доћи до што једноставнијег DPD модела, којим ће се ефикасно смањити утицај нелинеарне дисторзије у HBF mMIMO предајнику.
4. Четврта фаза – имплементација предложених архитектура у програмском пакету *Matlab*.
5. Пета фаза – Анализа добијених резултата и дефинисање даљих праваца истраживања везаних за дигиталну предисторзију у мобилним системима нове генерације.

7. Закључак и предлог

У предлогу тезе јасно је објашњен значај метода за дигиталну предисторзију, као и потреба да се развије што ефикаснији модел за дигиталну предисторзију код савремених бежичних предајника. На прегледан и јасан начин су дефинисана побољшања која би нови модели донели у линеаризацији сигнала код хибридног *beamforming* mMIMO предајника, изабране су адекватне методе истраживања, и прецизно идентификовани очекивани научни доприноси. Поред тога, дефинисан је одговарајући план истраживања, као и структура рада.

Досадашњи резултати Тамаре Мушкатиновић-Зекић у стручном и научном раду, публиковани научни резултати из области мобилних комуникационих система, и уже области дигиталне предисторзије, који су препознати и вредновани од стране међународне научне заједнице, у потпуности је квалификују за рад на предложеној теми.

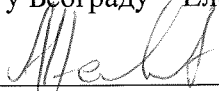
На основу свега наведеног закључујемо да **Тамара Мушкатиновић-Зекић, дипл. инж**, испуњава све услове за израду докторске дисертације на српском језику и потврђујемо научну заснованост предложене теме **„Модел дигиталне предисторзије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа”**. С обзиром на то да тема покрива актуелну област истраживања дигиталне предисторзије сигнала у савременим бежичним системима, као и да припада ужој научној области телекомуникација, те да је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан за ову научну област, за ментора предлагемо др Наташу Нешковић, редовног професора са Електротехничког факултета, Универзитета у Београду. У складу са овим предлогом, уз Извештај је приложен и списак радова др Наташе Нешковић, редовног професора, који је квалификују за ментора.

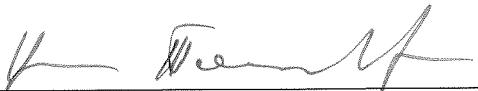
Сходно томе, предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета, Универзитета у Београду да прихвати тему докторске дисертације „**Модели дигиталне предисторзије за хибридне масивне вишеантенске предајнике са формирањем снопа применом неуралних мрежа**”, и да одобри кандидаткињи **Тамари Мушкатиновић-Зекић** израду докторске дисертације под наведеним насловом.

Београд, 07. март 2023. године

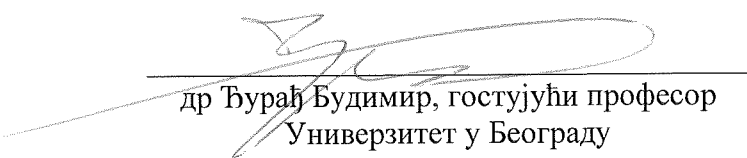
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Наташа Нешковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Александар Нешковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Никола Томашевић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин


др Милан Илић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Ђурађ Будимир, гостујући професор
Универзитет у Београду